

文章编号: 1005-0523(2023)03-0033-07



## 双层车辆段运用库环境振动特性实测分析

贺利工<sup>1</sup>, 刘文武<sup>1</sup>, 罗信伟<sup>1</sup>, 陈艳明<sup>2</sup>, 钟贞浪<sup>2</sup>, 徐浩能<sup>2</sup>

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510010;

2. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 现场实测某地铁典型双层车辆段运用库道床、柱子和盖板的振动加速度, 分析运用库振源特性及其传递衰减规律。结果表明: 列车分别通过一层和二层时各道床和柱子的振动相差不大, 但一层道床-柱子的振动衰减相对较大; 运用库盖板振动的卓越频率主要集中在 30~80 Hz, 靠近板中的测点振动响应大于盖板端部测点; 列车在运用库二层行车比一层行车引起上方盖板的振动响应大, 若进行上盖开发应当考虑对运用库二层进行减振设计; 无论是一层行车还是二层行车, 振动由道床传至柱子时全频段均在衰减, 且振动能量中的低频部分容易引起盖板的共振。

**关键词:** 双层车辆段; 运用库; 现场实测; 环境振动; 传递规律

中图分类号: U231

文献标志码: A

本文引用格式: 贺利工, 刘文武, 罗信伟, 等. 双层车辆段运用库环境振动特性实测分析[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(3): 33-39.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.20230505.007

## Measurement and Analysis of Environmental Vibration Characteristics of Operation Zone for Double Deck Depot

He Ligong<sup>1</sup>, Liu Wenwu<sup>1</sup>, Luo Xinwei<sup>1</sup>, Chen Yanming<sup>2</sup>, Zhong Zhenlang<sup>2</sup>, Xu Haoneng<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, China; 2. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** In this paper, the vibration acceleration of the ballast bed, pillar and cover plate of a typical double-deck metro depot was measured on site, and the characteristics of the vibration source and its transmission attenuation law were analyzed. The results show that the vibration of each ballast bed and pillar is not much different when the train passes through the first and second layers respectively, but the vibration attenuation of the first track bed-column is relatively large. The predominant frequency of the vibration of the cover plate is mainly concentrated in 30~80 Hz, and the vibration response of the measuring point near the center of the cover plate is greater than that at the end of the cover plate. The vibration response of the upper cover plate caused by the train running on the second floor of the operation zone is larger than that caused by the train running on the first floor. If the upper cover is developed, the vibration reduction design of the second floor should be considered. Whether it is a first-floor or a second-floor driving, the vibration is attenuated in the whole frequency range from the track bed to the column, and the low-frequency part of the vibration energy is easy to cause the resonance of the cover plate.

**Key words:** double-deck depot; operation zone; field measurement; environmental vibration; transmission law

收稿日期: 2022-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878277, 52068029); 江西省主要学科学术和技术带头人培养计划(2019BCJ22008); 江西省重点研发计划项目(2019ZBBE50008)

**Citation format:** HE L G, LIU W W, LUO X W. Measurement and analysis of environmental vibration characteristics of operation zone for double deck depot[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(3): 33-39.

## 1 研究背景及概况

车辆段作为地铁运营的保障基地,承担了车辆检修、车辆运用和全线设备设施综合维修和保养任务<sup>[1]</sup>,其占地面积广大且拥有同等面积的上盖平台,为了使车辆段上盖广阔平台得到合理利用,国内在北京、广州、深圳等大城市均着手车辆段上盖物业的开发与设计。

国内外学者对地铁运行引起的环境振动问题进行了一系列的研究<sup>[2-6]</sup>。Anderson<sup>[7]</sup>通过现场实测,发现列车运行引起的振动会与周边建筑物产生共振且共振频率范围在 0~10 Hz 之间。Zou 等<sup>[8-9]</sup>分别实测了广州和深圳某车辆段,并分析了振动从车辆段周围地面传至附近建筑的传播规律,结果表明,50 Hz 以上的振动响应衰减率大于 50 Hz 以下的振动响应衰减率。谢伟平<sup>[10-11]</sup>,冯青松<sup>[12]</sup>等对列车运行引起车辆段振动响应进行了大量的现场实测并建立车辆段上盖物业精细化有限元模型,以此模拟出列车运行时上盖物业的振动响应。刘文武<sup>[13]</sup>等实测分析了列车出入库盖板的振动规律,并结合现行标准进行了评价。

目前的研究大多针对单层车辆段内列车运行时附近建筑物或其上盖建筑物的振动分析,双层地铁车辆段作为一种新式结构,其振动传递路径的复杂性明显不同于单层车辆段,且目前对于列车运行引起的双层车辆段及其上部结构振动的研究较少。本文通过对某典型双层车辆基地的运用库源强及盖板进行现场实测,选取信噪比良好的数据进一步分析运用库的源强振动特性和振动传播规律,研究结果可供双层车辆段的减振设计参考。

## 2 现场测试

测试地点为某地铁典型双层车辆基地的运用库,测试内容包括采集运用库(一层 L17 股道,轨道形式为普通轨道,二层 L3 股道,轨道形式为减振轨道)和运用库上方盖板在列车通过时垂向振动加速度数据。测试列车为 6 节编组 B 型车,测试列车运行时速为 10 km/h,且每种工况均为一列车单独行

驶,无其他干扰因素,结合现场条件,运用库一层测点布置在 L17 股道的道床和最邻近轨道的框架柱子上,运用库二层测点分别布置在 L3 道床和最邻近 L3 股道的框架柱子上。运用库上方盖板为振动敏感区域,分别在运用库轨道上方盖板布置了 4 个振动测点 D1~D4。运用库剖面及盖板测点布置示意图如图 1 所示。

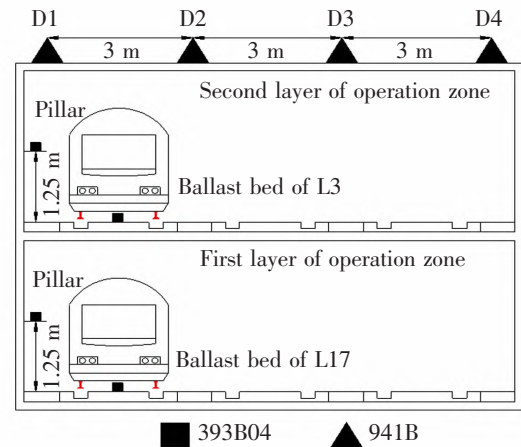


图 1 测点示意图

Fig.1 Schematic diagram of measuring points

本次测试所采用的数据采集仪包括 NI CRIO-9031 和 SQuadriga III 测试系统。其中 NI CRIO-9031 用于车辆段运用库内振动源强测试,并采用触发采样装置进行监测;SQuadriga III 用于车辆段上方盖板振动测试。道床和柱子振动数据采集选用 393B04 加速度传感器;上方盖板振动数据选用 941B 振动传感器采集。

## 3 运用库振动源强特性分析

本次测试共收集到上下两层有效行车数据各 10 组,图 2 和图 3 分别给出了运用库一、二层源强测点的典型垂向振动加速度时程曲线和频谱图。由图 2 可知,一层道床和柱子的垂向加速度时程峰值分别约为  $1.75 \text{ m/s}^2$  和  $0.26 \text{ m/s}^2$ ;一层道床垂向振动优势频段范围为 60~120 Hz,振动峰值频率出现在 87.8 Hz 处,柱子的振动优势频段范围为 60~100 Hz,振动峰值频率为 76.3 Hz。

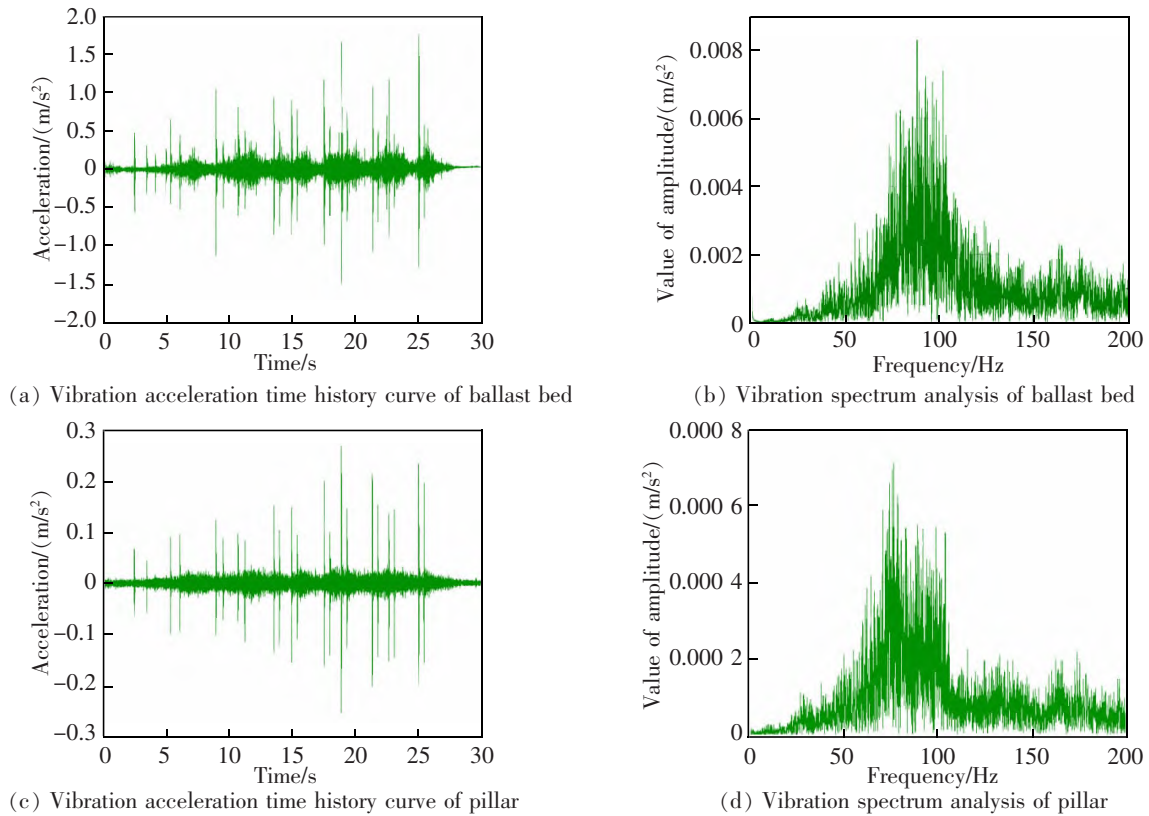


图 2 一层股道源强测点振动响应

Fig.2 Vibration response of the first-floor strand source strength measuring point

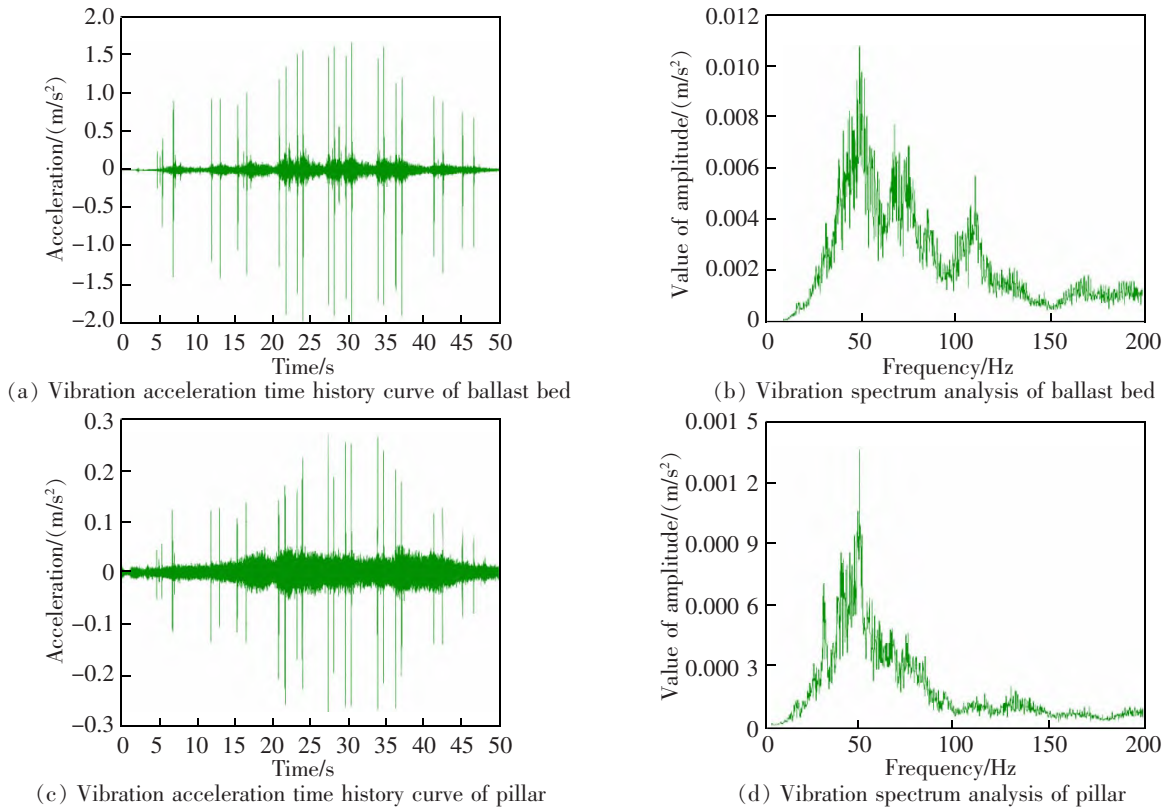


图 3 二层股道源强测点振动响应

Fig.3 Vibration response of the second-floor strand source strength measuring point

由图3可知,二层道床和柱子的加速度峰值均大于一层,分别约为 1.65 m/s<sup>2</sup> 和 0.27 m/s<sup>2</sup>,二层道床垂向振动优势频段范围在 30~100 Hz 内,振动峰值频率出现在 49.6 Hz 处,柱子的振动优势频段范围在 30~60 Hz 内,振动峰值频率出现在 50.8 Hz 处。

综上,一层道床和柱子振动峰值频率均大于二层道床和柱子。从钢轨处分析其原因,图4为上下两层钢轨测点频谱图,从中可知,一层钢轨在 100 Hz 处有明显的峰值振动,二层钢轨振动峰值也在 50 Hz 处,推测在该频段处钢轨结构模态被激发。此外二层钢轨在 160 Hz 处还存在峰值,但传至其他结构处未见峰值,可能是二层为大跨度混凝土结构,刚度较小,振动高频能量衰减更快,且二层为减振轨道,钢轨上的振动能量在流经减振扣件时高频能量也有所衰减。

源强测点振动响应有效数据平均值如表1所示。由表1可知,一、二层柱子的特征频带宽度均小于道床,频带宽度的减小主要因为振动传递过程中高频成分衰减过快。一层道床垂向加速度峰值和振

表1 源强测点振动响应

Tab.1 Vibration response of source intensity measuring point

Location	Index	Ballast bed	Pillar
First floor	Main frequency/Hz	60~120	60~100
	Peak value/(m/s <sup>2</sup> )	1.75	0.26
	Z-vibration level/dB	98.1	81.0
Second floor	Main frequency/Hz	30~120	30~70
	Peak value/(m/s <sup>2</sup> )	1.65	0.27
	Z-vibration level/dB	97.4	81.8

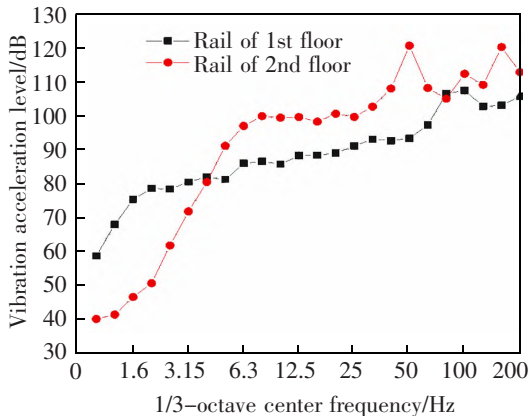


图4 钢轨测点 1/3 倍频谱

Fig.4 1/3 octave spectrum of rail measuring points

动加速度级均大于二层,而一层柱子垂向加速度峰值和振动加速度级均小于二层。这主要是因为运用库一层轨道位于地下基础之上,而二层轨道直接位于混凝土板上,一层道床的支承刚度大于二层,且一层道床振动的高频部分会被基础土层吸收一部分,从而导致从道床传至柱子的过程中,一层振动衰减量大于二层。

图5为运用库振源测点三分之一倍频程图,由图5可知:一、二层道床和柱子振动加速度级随 1/3 倍频变化的趋势基本一致,一层道床和柱子的加速度级在 5~80 Hz 频段内逐渐增加,峰值频率在 80 Hz 附近,在 80~200 Hz 频段内逐渐下降;二层道床和柱子的加速度级在 50 Hz 处达到峰值。除了 12.5~63 Hz 频段外,一层道床和柱子振动加速度级分别大于二层道床和柱子,结果和频域图中反映的规律相近。

为了更直观地展现振动从道床至柱子的传递损失,采用分频段传递损失比来分析其衰减情况,分频段传递损失比可定义为

$$\eta_i = \frac{T_i - B_i}{T_i} \quad (1)$$

式中: $\eta_i$ 为轨枕-柱子第*i*个 1/3 倍频段的传递损失比; $T_i$ 为轨枕第*i*个 1/3 倍频段振动加速度级; $B_i$ 为柱子第*i*个 1/3 倍频段振动加速度级。

图6所示为一、二层道床-柱子分频段传递损失比。由图6可知,一层道床-柱子振动传递损失比最大为 0.60,而二层振动传递损失比最大为 0.34;一层道床-柱子振动传递损失比随 1/3 倍频程中心频率变化总体呈减小趋势,振动传递损失比在 1~6 Hz 低频内均大于二层,在 6.3~200 Hz 频段内,一、二层

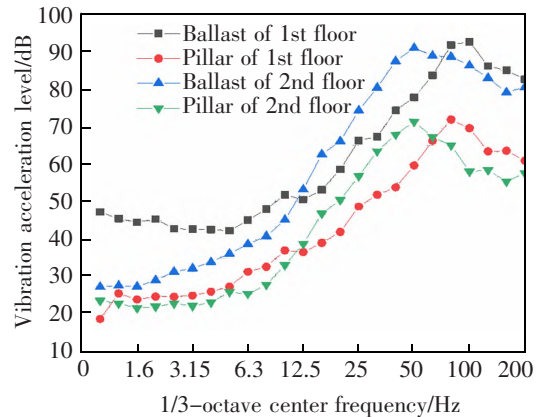


图5 源强测点 1/3 倍频谱图

Fig.5 1/3 octave spectrum of source intensity measuring point

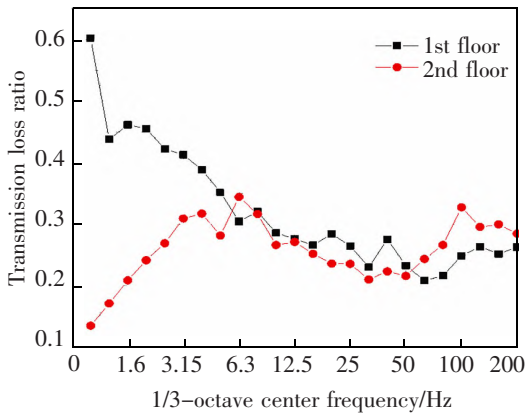


图 6 道床-柱子分段传递损失比  
Fig.6 Transfer loss ratio of ballast-column frequency division

道床-柱子分段传递损失比量值相当, 综上可解释虽然一层道床的  $Z$  振级大于二层, 但由于道床振动传递到柱子的过程中土体吸收了振动中较多的低频能量, 使得一层的低频振动衰减更大, 从而使得一层柱子的  $Z$  振级小于二层柱子。

#### 4 振动传播规律

##### 4.1 盖板振动分析

为分析运用库一、二层行车诱发盖板的振动规律, 分别测试记录列车通过一层 L17 股道和二层 L1、L3 股道时盖板测点的振动响应, 表 2 为运用库列车诱发盖板测点  $Z$  振级统计表。

由表 2 可知, 列车在运用库二层行车比一层行车引起上方盖板的振动响应大, 两者相差约 8~14 dB; 列车在运用库二层或一层行车引起盖板板中的振动响应都大于盖板端部(D2/D3 大于 D1/D4), 其原因可能是盖板端部受梁的约束较大, 车辆段盖板的振动评价应选取板中的振动响应。

表 2 运用库列车诱发盖板最大  $Z$  振级统计表  
Tab.2 Statistical table of maximum  $Z$  vibration level of cover plate caused by the train operation

Stock channel	Number of tests	$Z$ vibration level of each test point/dB			
		D1	D2	D3	D4
First floor	1	59.5	61.3	59.8	52
L17	2	60.6	62	58.9	52.5
Second floor	3	66.7	70	71	61.6
	4	70.2	73.1	74.2	65.2
	5	69	72.6	74.6	66.4
	L3	6	69.4	72.6	74.9

图 7 和图 8 为运用库一、二层行车诱发盖板各测点垂向 1/3 倍频谱。可知: 各测点各分频振级变化趋势相似, 盖板振动的卓越频率主要集中在 25~80 Hz。在 4 Hz 低频范围内, 盖板各测点振动加速度级变化趋势基本一致, 靠近板中的测点振动响应大于盖板端部测点。

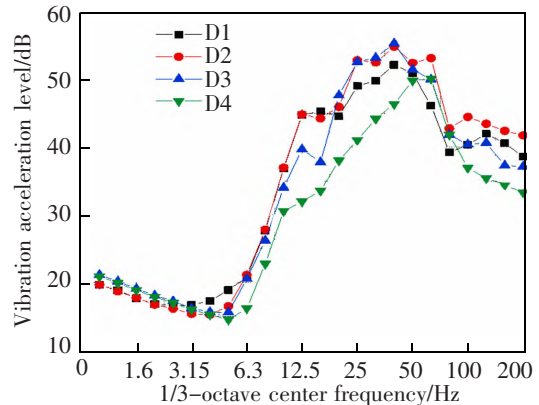


图 7 一层行车盖板各测点 1/3 倍频谱  
Fig.7 1/3 octave spectrum of each measuring point of the cover plate when driving on the the first floor

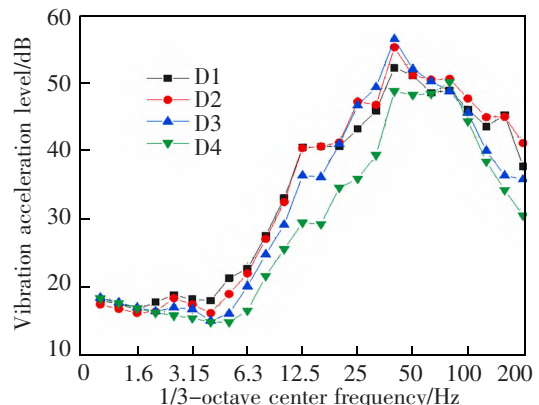


图 8 二层行车盖板各测点 1/3 倍频谱  
Fig.8 1/3 octave spectrum of each measuring point of the cover plate when driving on the the second floor

##### 4.2 振动传递分析

为进一步分析运用库振动的传播衰减规律, 分别计算同一竖直断面一、二层道床、柱子和盖板的  $Z$  振级平均值, 统计结果见表 3。

由表 3 可知: 当列车在一、二层行车时, 振动由道床-柱子-盖板的传递方向逐渐衰减。一层行车时, 振动从道床传至柱子时  $Z$  振级减小了 19.67 dB, 从柱子传至盖板时,  $Z$  振级减小了 5.3 dB; 二层行车时, 振动波由道床传至柱子时  $Z$  振级减小了 19.54 dB, 由柱子传至盖板时  $Z$  振级减小了 1.35 dB。综上, 运用库二层行车诱发的盖板振动大于一层行车。

表3 运用库列车各测点Z振级统计表  
Tab.3 statistical table of Z vibration level of each measuring point of trains in operation zone

Working conditions	Ballast bed	Pillar	Coverplate
First floor traffic	77.83	58.16	52.86
Second floor traffic	82.98	63.44	62.09

图9和图10分为车辆段一、二层各测点及盖板的1/3倍频谱。可知,当列车在一层行车时,振动由道床传递至柱子时各分频振级均出现衰减,由柱子传至盖板时在1~10 Hz和50~200 Hz均出现较大的衰减。当列车在二层行车时,振动由道床传至柱子时各分频振级均出现衰减,由柱子传至盖板时在1~6.3 Hz和50~200 Hz频段内振动衰减量较一层行车时的衰减量少,从振动传递路径可以看出:一层行车产生的振动波除了经过土体衰减外还要经过竖向两根车辆段柱子,传递路径和复杂程度远

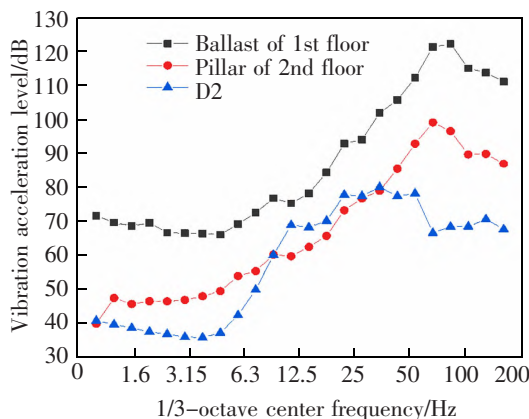


图9 一层行车各测点1/3倍频谱

Fig.9 1/3 octave spectrum of each measuring point when driving on the the first floor

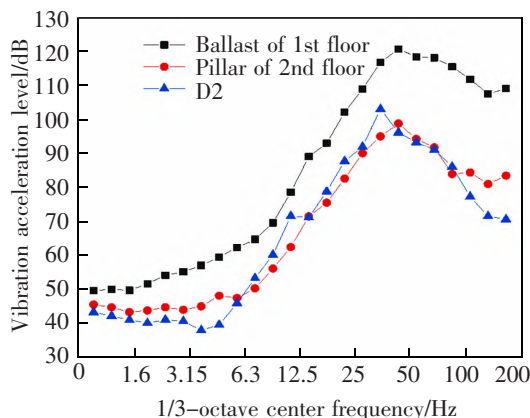


图10 二层行车各测点1/3倍频谱

Fig.10 1/3 octave spectrum of each measuring point when driving on the the second floor

大于二层行车。另外,不论是一层行车还是二层行车,在10~30 Hz以内,盖板的振动加速度级均大于柱子,这主要是盖板材料在其固有频率处出现了共振现象而引起的增大。

## 5 结论

1) 列车分别通过一层和二层时各道床和柱子的振动响应相差不大,但一层道床-柱子的振动衰减相对二层较大;一层道床和柱子加速度级峰值频率在80 Hz附近,二层道床和柱子的峰值频率在50 Hz附近。

2) 运用库行车诱发盖板振动的卓越频率主要集中在25~80 Hz。在低频范围内,盖板各测点振动加速度级变化趋势基本一致,靠近板中的测点振动响应大于盖板端部测点,车辆段运用库盖板的振动评价应选取板中的振动响应。

3) 列车在运用库二层行车比一层行车引起上方盖板的振动响应大,若进行上盖开发应当优先考虑对运用库二层进行减振设计。

4) 无论是一层行车还是二层行车,振动由道床传至柱子时全频段均在衰减,且振动能量中的低频部分容易引起盖板的共振。

## 参考文献:

- [1] 王孔明,杨文锐,徐银光. 地铁车辆段控制中心(DCC)综合信息系统研究[J]. 华东交通大学学报,2018,35(3):56-61.  
WANG K M, YANG W R, XU Y G, et al. Study on comprehensive information system of metro vehicle depot control center[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2018, 35(3): 56-61.
- [2] 夏禾,曹艳梅. 轨道交通引起的环境振动问题[J]. 铁道科学与工程学报,2004(1):44-51.  
XIA H, CAO Y M. Problems of railway traffic induced vibrations of environments[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2004(1): 44-51
- [3] 刘维宁,马蒙,刘卫丰,等. 我国城市轨道交通环境振动影响的研究现状[J]. 中国科学:技术科学,2016,46(6):547-559.  
LIU W N, MA M, LIU W F, et al. Overview on current research of environmental vibration influence induced by urban mass transit in China[J]. Science Sinica Technologica, 2016, 46(6): 547-559.

- [4] 盛涛,张善莉,单伽钲,等. 地铁诱发的环境振动及振源减振效应的实测与分析[J]. 振动测试与诊断,2015,35(2):352-358.  
SHENG T,ZHANG S L,SHAN J Z,et al. In-situme measurement and anasysis of subway-induced environmental vibrations and the effectiveness of vibration-souce suppression methods[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis,2015,35(2):352-358.
- [5] 栗润德,刘维宁,张鸿儒. 区间地铁列车振动的地面响应测试分析[J]. 中国铁道科学,2008(1):120-126.  
LI R D,LIU W N,ZHANG H R. Test analysisof metro induced ground vibrations at interval[J]. China Railway Science,2008(1):120-126.
- [6] TRIEPAISCHAJONSAK N,THOMPSON D J. A hybrid modelling approach for predicting ground vibration from trains [J]. Journal of Sound and Vibration,2015,335:147-173.
- [7] ANDERSON D C. Engineering prediction of railway vibration transmitted in buildings[J]. Environmental Engineering,1994,7(1):321-336.
- [8] ZOU C,WANG Y,MOORE J A,et al. Train-induced field vibration measurements of ground and over-track buildings [J]. Science of the Total Environment,2017,575:1339-1351.
- [9] ZOU C,WANG Y,WANG P,et al. Measurement of ground and nearby building vibration and noise induced by trains in a metro depot[J]. Science of the Total Environment,2015,536:761-773.
- [10] 谢伟平,陈艳明,姚春桥. 地铁车辆段上盖物业车致振动分析[J]. 振动与冲击,2016,35(8):110-115.  
XIE W P,CHEN Y M,YAO C Q. Vibration analysis of train depot over-track buildings induced by train load[J]. Journal of Vibration and Shock,2016,35(8):110-115.
- [11] 何卫, 谢伟平. 地铁车辆段列车动荷载特性实测研究[J]. 振动与冲击,2016,35(8):132-137.  
HE W,XIE W P. Field measurement of the subway train loading in a car depot[J]. Journal of Vibration and Shock,2016,35(8):132-137.
- [12] 冯青松,王子玉,刘全民,等. 双振源激励下地铁车辆段上盖建筑物振动特性[J]. 交通运输工程学报,2019,19(4):59-69.  
FENG Q S,WANG Z Y,LIU Q M,et al. Vibrationcharacteristic of metro depot upper building under double vibration soucer exctation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2019,19(4):59-69
- [13] 刘文武,罗信伟,冯青松,等. 地铁下沉式车辆基地振动测试与评价[J]. 噪声与振动控制,2019,39(6):140-146.  
LIU W W,LUO X W,FENG Q S,et al. Vibration testing and assessment of underground metro depots[J]. Noise and Vibration Control,2019,39(6):140-146.



第一作者:贺利工(1974—),男,教授级高级工程师,研究方向为地铁设计。E-mail:heligong@gmdi.cn。



通信作者:陈艳明(1990—),男,博士,研究方向为铁路环境振动与噪声控制。E-mail:944894571@qq.com。

(责任编辑:姜红贵)